

Jessica García Flores

**Optimización del sistema de aireación de un reactor
carrusel adaptado a modo SBR**

**Trabajo Fin de Máster
Dirigido por Dra. Sandra Contreras Iglesias**

Máster en Ingeniería Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2024

ÍNDICE

1	Memoria	5
1.1	Objeto	5
1.2	Alcance	5
1.3	Antecedentes	6
1.4	Introducción.....	6
1.4.1	Etapas de tratamiento de la EDAR	7
1.4.2	Tratamiento biológico.....	8
1.4.3	Cargas contaminantes de diseño de la EDAR.....	11
1.4.4	Consumo energético.....	11
1.4.5	Implementación del modo SBR.....	12
1.5	Normas y referencias	14
1.5.1	Disposiciones legales y normas	14
1.5.2	Programas informáticos	14
1.5.3	Plan de gestión de calidad aplicado	14
1.5.4	Bibliografía	15
1.5.5	Otras referencias.....	15
1.6	Definiciones y abreviaturas.....	16
1.6.1	Definiciones.....	16
1.6.2	Abreviaturas	16
1.7	Requisitos de diseño	18
1.7.1	Características del agua de entrada	18
1.7.2	Limitaciones del agua de salida	18
1.8	Descripción del proceso.....	19
1.8.1	Pretratamiento.....	19
1.8.2	Tratamiento secundario	19
1.9	Parámetros operativos	21
1.9.2	Capacidad de la zona aerobia y anóxica del reactor	22
1.10	Optimización del sistema de aireación	23
1.10.1	Necesidad teórica de oxígeno del sistema	23
1.10.2	Demanda de aire	23
1.10.3	Soplante D19S.....	24
1.10.4	Tiempos de funcionamiento de la soplante	25
1.10.5	Monitorización del sistema de aireación	26
2.1	Conclusiones	29

3	Propuestas de mejora	31
4	Anexos	31
5	Planos	31

1 Memoria

Este documento representa una versión reducida y simplificada del proyecto real. La información contenida en este documento ha sido adaptada para proteger la confidencialidad de la empresa. Para cualquier consulta o aclaración, deberá comunicarse con la empresa Cadagua, S.A.

1.1 Objeto

El propósito principal de este proyecto es llevar a cabo la optimización del sistema de aireación del tratamiento secundario de la estación depuradora de aguas residuales del municipio de El Catllar. Específicamente, se centra en el estudio de la viabilidad de llevar a cabo la automatización del sistema de aireación existente, con el fin de mejorar la eficiencia operativa y reducir el consumo energético.

Dado que las soplantes desempeñan un papel crítico en el proceso de tratamiento, este estudio se enfocará en obtener los parámetros necesarios para su óptimo funcionamiento en función de los caudales reales que ingresan a planta, siempre teniendo en cuenta la necesidad de cumplir con los requisitos regulatorios pertinentes para el vertido de aguas residuales tratadas en el cauce público.

En este sentido, este proyecto no solo busca optimizar el funcionamiento del sistema de aireación y, con ello, la eficiencia energética, sino también garantizar la calidad del efluente tratado para proteger el medio ambiente y cumplir con las normativas legales establecidas.

1.2 Alcance

El alcance del proyecto se centra en el estudio de mejora del funcionamiento y, por ende, la reducción del consumo energético del sistema de aireación existente en el tratamiento biológico de la depuradora de El Catllar. Asimismo, se llevará a cabo el estudio de la viabilidad de automatizar el proceso mediante la monitorización de los parámetros más representativos.

Para lograr el objetivo principal, se han establecido una serie de objetivos específicos que incluyen:

- Estudio de la capacidad requerida de la zona aerobia y anóxica del reactor biológico considerando los caudales reales de entrada, con la posterior verificación de estos volúmenes en el reactor existente.
- Cálculo de la demanda de oxígeno necesaria para llevar a cabo las reacciones del tratamiento secundario.
- Determinación del caudal de aire necesario real que debe proporcionar la soplante existente.
- Determinación del caudal de operación de la soplante de menor capacidad y cálculo de los tiempos de funcionamiento necesarios.
- Monitorización de los parámetros clave del proceso, como el nitrógeno amoniacal y el nitrato, en función de los tiempos de aireación y de la concentración de oxígeno.
- Análisis de la posibilidad de automatizar el equipo, considerando los resultados obtenidos.

Cabe destacar que este proyecto no incluye la elaboración de un pliego de condiciones, mediciones y presupuesto, ya que estos aspectos no forman parte del alcance de este proyecto en específico.

1.3 Antecedentes

Entre los años 2014 y 2016, con la finalidad de tratar las aguas provenientes del centro penitenciario y de las urbanizaciones del sector suroeste del municipio de El Catllar, se redactó el proyecto constructivo de la estación depuradora de aguas residuales. En octubre de 2016, se inició la ejecución de las obras y, tras completarlas, la instalación se puso en marcha en abril de 2017.

Inicialmente, el reactor biológico que forma parte del tratamiento secundario de la depuradora fue diseñado para lograr la reducción de los compuestos orgánicos y nutrientes presentes en el agua residual mediante un proceso basado en fangos activos de aireación prolongada, implementado en un reactor carrusel o canal de oxidación. El diseño del reactor incluyó un modo de operación continuo de desnitrificación simultánea, con un canal aerobio y otro anóxico. El suministro de aire en la zona aerobia se realizaba de forma intermitente a través de un grupo de soplantes que operaban 15 horas diarias.

En junio de 2023, se llevó a cabo una modificación del reactor y del sistema de aireación, que implicó la adaptación y programación del reactor biológico para operar en modo SBR y la sustitución de una de las soplantes por otra de menor capacidad con el fin de optimizar la eficiencia energética del sistema. Sin embargo, esta modificación no incluyó la automatización del sistema de aireación, sino que su funcionamiento actual está basado en un tiempo establecido por el usuario. Debido a ello, en el presente proyecto se busca optimizar el funcionamiento del sistema de aireación y, por ende, conseguir un ahorro energético evaluando la viabilidad de automatizar los equipos que suministran el aire en función de las sondas disponibles en la planta.

1.4 Introducción

La Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) del municipio de El Catllar, ubicada en la comarca del Tarragonés, específicamente en una parcela situada en el margen izquierdo del Barranc de la Mora y al noreste de la urbanización la Quadra de Manous, ha sido diseñada para satisfacer las necesidades presentes y futuras de la población, considerando el crecimiento proyectado según el Plan de Ordenanzas Urbanística Municipal (POUM). Esta instalación tiene como objetivo tratar las aguas residuales urbanas provenientes de los núcleos del sector suroeste (urbanización del Mas d'Enric-Pins Manous, urbanización del Esplai Tarragoní y la de Cinco Estrellas), así como los procedentes del Centro Penitenciario Mas d'Enric. Las aguas a tratar son recogidas y dirigidas por gravedad a la estación depuradora a través de cuatro ejes de colectores con una longitud total de 4.6 km.

Tabla 1. Población de diseño.

	Población servida (hab)	Población equivalente (hab-eq) *
EDAR CATLLAR	3846	5543

Nota: (*): Población equivalente calculada a partir de la dotación de 60 gDBO5/(d·hab·eq) establecida por la Directiva 91/271/CEE de 21 de mayo sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas.



Figura 1. Ubicación de la EDAR del municipio de El Catllar.¹

1.4.1 Etapas de tratamiento de la EDAR

La población servida y las aguas residuales de carácter 100% urbano están tratadas con las unidades de proceso que se mencionan de manera resumida a continuación:

Línea de agua:

- Pozo de gruesos y aliviadero general de planta con desbaste.
- Bombeo de elevación de agua de entrada y medida de caudal.
- Desbaste de gruesos y finos automáticos.
- Desarenador y desengrasador (incluye separador de gruesos, clasificador de arenas y grupo de soplantes).
- Tratamiento biológico (canal de oxidación).
- Instalación de dosificación y almacenaje de cloruro férrico.
- Decantación secundaria.
- Obra de salida y medida de agua tratada (incluye bombeo de agua de servicio).

Línea de fangos:

- Bombeo de fangos en recirculación y en exceso.
- Espesador de fangos por gravedad.
- Depósito de recepción de fangos.
- Bombeo de fangos espesados a deshidratación.
- Deshidratación de fangos (1 centrífuga).
- Instalación de preparación y dosificación de polielectrolito catiónico.
- Elevación de fangos deshidratados a almacenaje con tornillos transportadores.
- Almacenaje de fangos deshidratados (1 silo).

Instalaciones auxiliares:

- Desodorización a través de biofiltro.
- Grupo de presión de agua de servicios, con filtración y desinfección con cloro.
- Grupo electrógeno para alimentar pretratamiento.
- Edificio de control (control y soplantes del tratamiento biológico).
- Edificio de proceso (deshidratación y soplantes pretratamiento).

¹ Visor SIGPAC. (s. f.-b). <https://sigpac.mapa.gob.es/fega/visor/>

1.4.2 Tratamiento biológico

1.4.2.1 Reactor biológico y sistema de aireación

Uno de los equipos principales del tratamiento secundario y de la planta es el reactor biológico. Este reactor tiene como función facilitar la reducción de los compuestos orgánicos sólidos y nutrientes presentes en el agua residual.

En la planta de estudio, se utiliza un proceso de fangos activos de aireación prolongada, en el que destaca una elevada edad del fango para garantizar el desarrollo adecuado de los microorganismos que realizan la nitrificación y desnitrificación, asegurando así la correcta eliminación de nutrientes y la estabilización de los fangos del decantador secundario, sin necesidad de incluir un proceso de digestión anaeróbica posterior.

La eliminación de nutrientes se puede lograr mediante diversos sistemas constructivos y de operación. En este caso, se emplea un proceso de desnitrificación simultánea, en el que el agua residual recorre zonas aerobias y anóxicas. Este proceso se lleva a cabo en un reactor de tipo carrusel o canal de oxidación, el cual tiene una forma semi-ovalada con dos canales separados por un tabique longitudinal y cuenta con dos deflectores de hormigón en cada extremo. Estas características garantizan una velocidad de giro adecuada del agua y contribuyen a reducir los fenómenos de sedimentación.

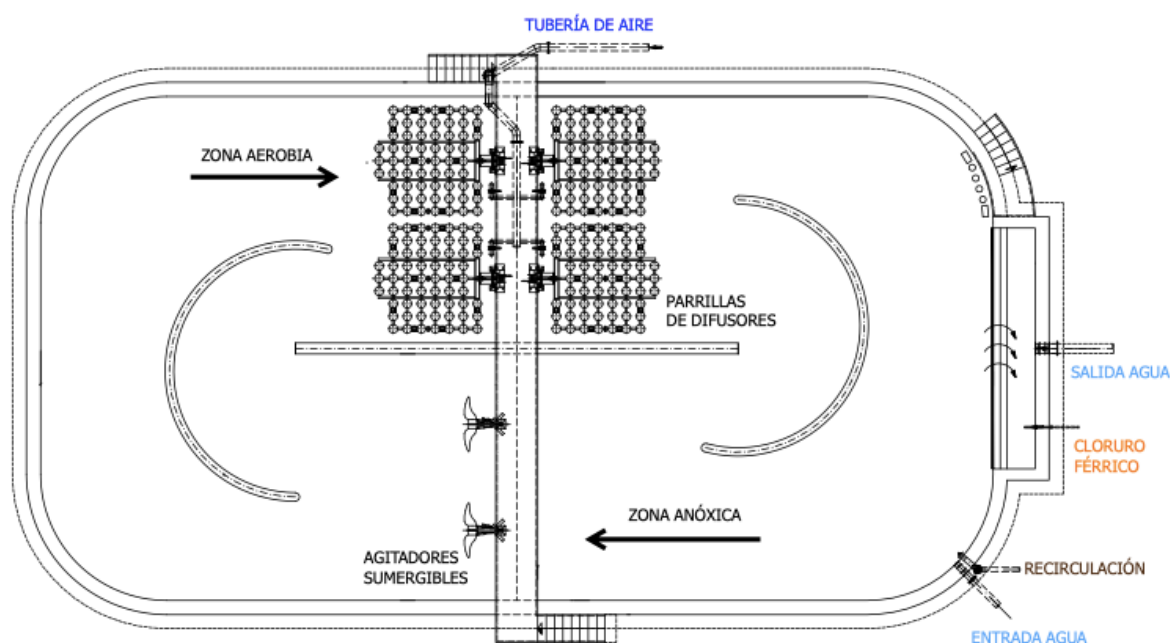


Figura 2. Esquema del reactor carrusel instalado en planta.²

Como se observa en el esquema de la Figura 2, tanto la entrada como la salida del agua se realizan por el mismo extremo del reactor, lo que permite un aprovechamiento completo de su volumen. La circulación del agua se consigue mediante dos vehiculadores de flujo, los cuales mueven el agua a una velocidad entre 0.25 y 0.35 m/s, manteniendo los sólidos en suspensión y asegurando una mezcla completa. En la misma zona donde se introduce el agua procedente del pretratamiento, se encuentra la entrada bombeada de la recirculación de fangos proveniente del decantador secundario. Finalmente, la salida de agua del reactor

² Modificación del plano del proyecto AS BUILT de la empresa.

biológico se produce por rebose hacia un canal de salida que conecta las aguas con el decantador secundario.

En este tipo de reactores y con los parámetros de entrada previstos, no se garantiza la eliminación biológica de fósforo en el agua residual, por lo que se recurre a una precipitación química a través de la dosificación de cloruro férrico en la salida del reactor.

A continuación, se presentan los datos de proyecto del reactor.

Tabla 2. Dimensionamiento del reactor biológico.

Características	Valores
Caudal medio (m ³ /h)	41.7
Caudal punta (m ³ /h)	83.3
Número de reactores (ut)	1
Volumen unitario (m ³)	3195
Longitud (m)	34
Amplitud del canal (m)	8.8
Altura del agua (m)	5.5
MLSS (mg/L)	4000
Carga másica (kgDBO ₅ /kg·d)	0.03
Edad del fango (d)	32.3
Tiempo de retención (días)	3.2
Temperatura (°C)	15

La aportación de aire al proceso de tratamiento se lleva a cabo a través de un grupo de soplantes de alta eficiencia insonorizadas instaladas en una sala específica. Estos equipos están alimentados por variadores de frecuencias que permiten aumentar gradualmente el caudal de aire suministrado en función del caudal de entrada. El oxígeno proporcionado por estos equipos se transfiere a través de difusores de burbuja fina distribuidos sobre cuatro parrillas elevables que facilitan el mantenimiento.

A continuación, se presenta el dimensionamiento inicial del sistema de aireación.

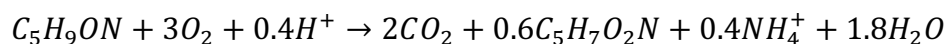
Tabla 3. Dimensionamiento de la aireación del tratamiento biológico.

Características	Valores
Tipo y número de soplantes (ut)	Soplantes de émbolos rotativos Delta Hybrid (2+1R) Fabricante: Aerzen
Caudal unitario máximo (m ³ /h)	1500
Número de parillas de difusores	4
Tipo de difusores	Difusores de membrana de disco de burbuja fina
Número total de difusores	252
Rendimiento aporte oxígeno (kgO ₂ /kWh)	3

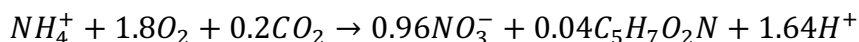
1.4.2.2 Fases del proceso

Las etapas de proceso que conforman el tratamiento de fangos activos con aireación prolongada son la eliminación de materia orgánica y la eliminación de nutrientes (nitrificación y desnitrificación). Las reacciones que tienen lugar son las siguientes:

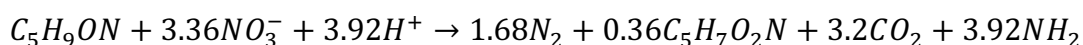
Metabolización aerobia de la materia orgánica: Las bacterias heterótrofas utilizan el oxígeno disuelto en el agua como aceptor terminal de electrones en la oxidación de la materia orgánica. La energía liberada en esta reacción es utilizada por las bacterias para el mantenimiento y la producción de nueva biomasa.



Nitrificación: Se trata de una reacción aerobia en la cual el amonio, inicialmente presente en el agua residual y producido por la actividad de las bacterias heterótrofas, es oxidado en dos etapas: en la primera etapa, el amonio (NH_4^+) se oxida a nitrito (NO_2^-), y en la segunda etapa, el nitrito se oxida a nitrato (NO_3^-). Esta reacción es llevada a cabo por bacterias autótrofas, que utilizan el dióxido de carbono como fuente de energía para la síntesis de biomasa.



Desnitrificación: En condiciones de anoxia, las bacterias heterótrofas, utilizan los grupos nitrito y/o nitrato como aceptores finales de electrones. Esto provoca la reducción de las formas oxidadas de nitrógeno (N_5^+ y N_3^+) a nitrógeno gas (N_2). El nitrógeno molecular es poco soluble en agua y se disipa rápidamente a la atmósfera. Simultáneamente se producen reacciones de síntesis de nuevas células y se utiliza materia orgánica como fuente de carbono.



Tanto la metabolización de la materia orgánica como la desnitrificación son reacciones realizadas por bacterias heterótrofas que utilizan materia orgánica (C_5H_9ON) como fuente de carbono. Sin embargo, las tres reacciones producen células nuevas ($C_5H_7O_2N$).

A continuación, se muestra un esquema resumen de las transformaciones que se producen hasta obtener el nitrógeno gaseoso.

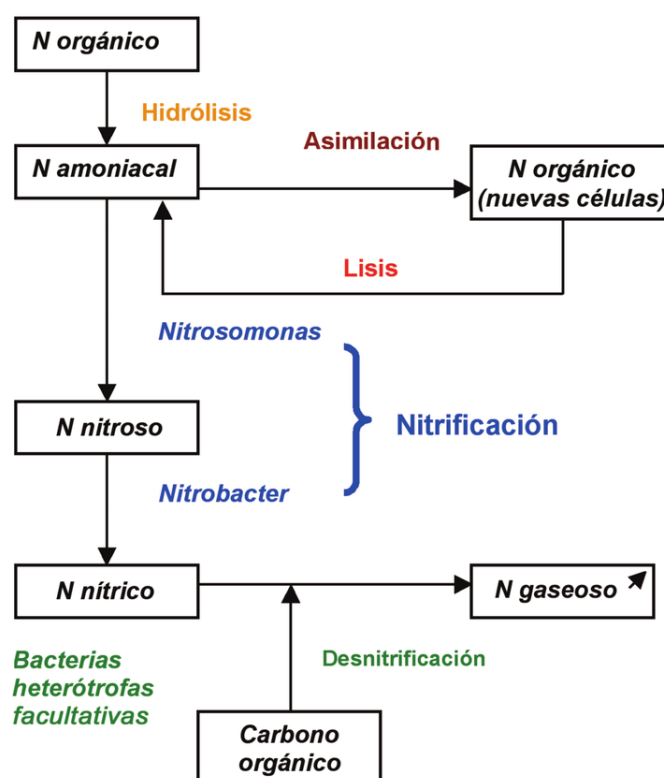


Figura 3. Transformaciones del nitrógeno en los procesos de tratamiento biológico. ³

³ Salas Rodríguez, Juan José. et al. Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Sevilla: Centro de Nuevas Tecnologías del Agua CENTA, 2007.

1.4.3 Cargas contaminantes de diseño de la EDAR

1.4.3.1 Cargas contaminantes del agua de entrada:

El diseño de la EDAR se llevó a cabo considerando dos estados temporales que reflejaban el crecimiento poblacional previsto y las variaciones estacionales, teniendo en cuenta caudales diferenciados entre temporada alta y baja. Con una población de diseño de 5543 habitantes equivalentes y un caudal medio de 1000 m³/día, se establecieron las siguientes concentraciones contaminantes en el agua de entrada a planta.

Tabla 4. Cargas contaminantes del agua de entrada.

Parámetro	Concentración agua de entrada (mg/L)
DBO ₅	333
DQO	941
SS	547
N _T	103
P _T	13

1.4.4 Consumo energético

La preocupación por el coste energético se ha convertido en un aspecto central en la gestión de las estaciones depuradoras de aguas residuales, dado que el consumo eléctrico representa una parte significativa de los costes de explotación, como se evidencia en el gráfico de la Figura 4.

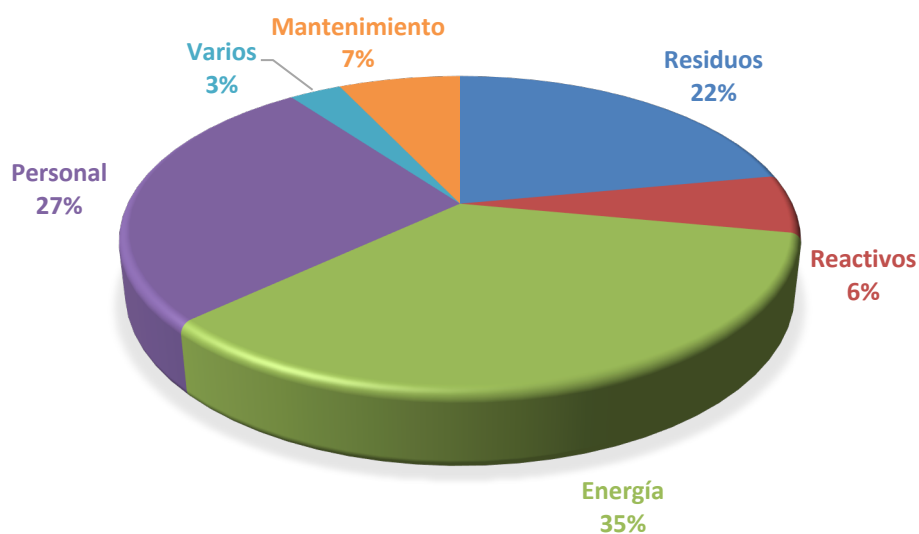


Figura 4. Distribución del coste de una EDAR.⁴

En la EDAR de El Catllar, el tratamiento biológico destaca como el mayor consumidor de energía, representando el 49% del total según el gráfico presentado en la Figura 5, basado en datos reales de la planta. Este alto porcentaje podría atribuirse en gran medida al sobredimensionamiento del reactor biológico.

⁴ Adaptación del documento "Tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras" del Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana" - CEDEX.

Inicialmente, el reactor fue proyectado y diseñado para un caudal de 1000 m³/día. Sin embargo, el caudal actual de agua residual entrante es de aproximadamente 300 m³/día, lo que equivale a un 30% de su capacidad total. Este sobredimensionamiento puede ocasionar varios problemas, incluida la ineficiencia energética, ya que una capacidad superior puede provocar que los sistemas de aireación y mezcla funcionen a niveles innecesariamente elevados, lo que resulta en un mayor consumo de energía por parte de las soplantes. Además, el exceso de oxígeno debido al sobredimensionamiento puede provocar la proliferación de tipos de microorganismos no deseados que pueden afectar a la eficiencia del proceso, así como un aumento considerable de los costos de aireación.

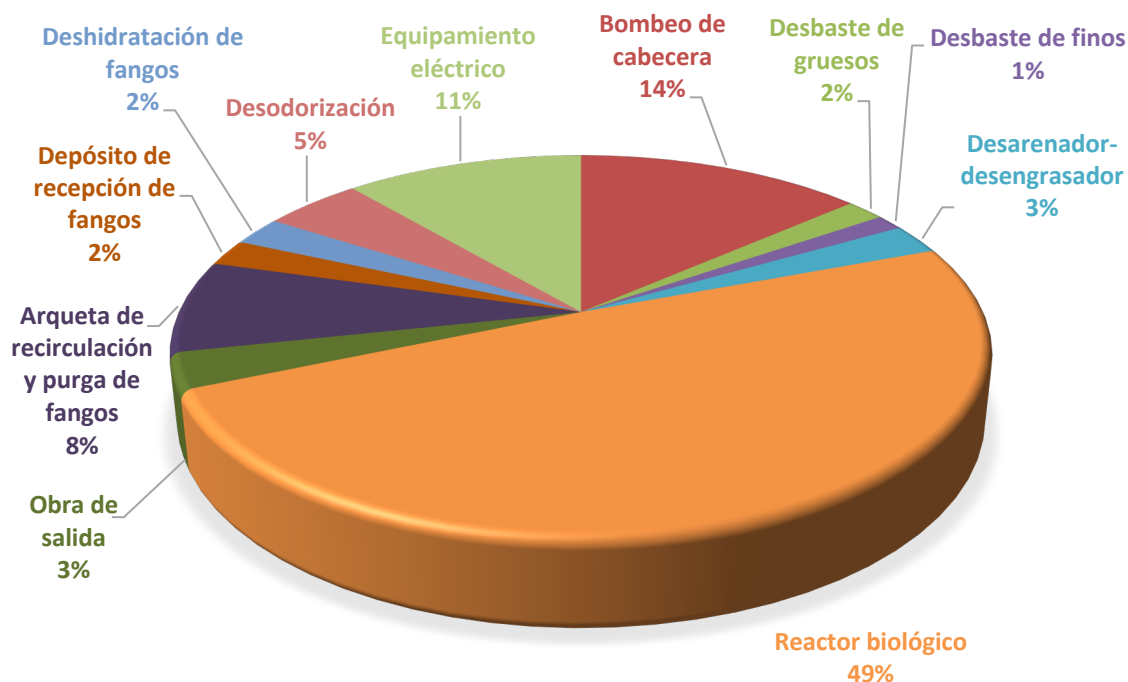


Figura 5. Consumo anual en kWh de la EDAR de El Catllar. ⁵

1.4.5 Implementación del modo SBR

Como solución al consumo elevado de energía, la anterior explotadora llevó a cabo el reemplazo de una de las soplantes por un modelo de menor capacidad y realizó una serie de modificaciones para adaptar el reactor biológico a modo SBR.

1.4.5.1 Fases del modo SBR

Las fases que se llevan a cabo en un proceso que funciona en modo SBR son:

- Fase de reposo: El proceso se mantiene en espera hasta que el nivel en el depósito donde se almacena el agua de entrada alcance un punto suficiente para permitir que las bombas impulsen el agua de entrada hacia el pretratamiento.

Fase de carga: Durante la primera etapa del ciclo, el agua residual a tratar se introduce en el reactor con los vehiculadores encendidos para mantener una mezcla homogénea en el interior. Durante esta fase, también se puede incorporar la recirculación proveniente del decantador secundario.

⁵ Elaboración propia con datos de proyecto.

- Fase de aireación o de reacción: En esta etapa, se activan tanto los equipos de aireación como los vehiculadores de flujo y ocurre la reducción de la materia orgánica y de los nutrientes presentes en el agua residual. En esta fase, también se realizan las purgas del reactor biológico cuando es necesario.

- Fase de decantación: Durante esta etapa, se interrumpe tanto la aireación como la agitación del reactor para crear las condiciones favorables que permiten la sedimentación del fango activo.

- Fase de descarga: Una vez que el agua residual clarificada se ha separado por el manto de fangos al finalizar la fase de decantación, se retira del reactor mediante una bomba de evacuación.

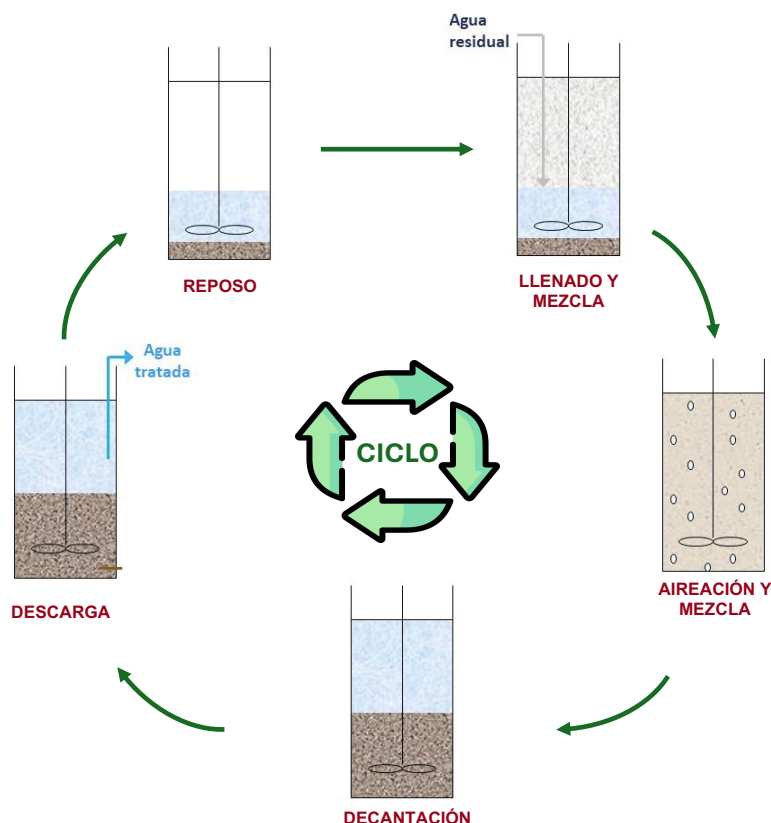


Figura 6. Esquema de reactor biológico secuencial. Adaptación de CEDEX.⁶

1.4.5.2 Análisis de los resultados obtenidos

Tras la implementación del modo SBR y la optimización del sistema de aireación, se llevó a cabo un estudio comparativo para cuantificar el ahorro energético derivado de estas medidas. Este estudio comparó dos períodos: uno en modo carrusel (septiembre de 2021-abril de 2022) y otro en modo SBR (septiembre 2022-abril 2023), durante el cual se utilizó el nuevo equipamiento más eficiente. Los resultados de este análisis revelaron una reducción significativa en el consumo energético durante el período en modo SBR, con una diferencia de 33 kWh/d (14%) en comparación con el modo carrusel.

⁶ Adaptación del documento "Tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras" del Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana" - CEDEX.

El ahorro energético obtenido con el nuevo modo de funcionamiento SBR y el equipamiento mejorado se estimó en 0.86 kWh/kg de DBO₅ eliminada y 4.18 kWh/N_T elim., lo que equivale a un máximo de 69-85 kWh/d ahorrados.

1.5 Normas y referencias

1.5.1 Disposiciones legales y normas

Normas:

- UNE 157001 Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.
- Directiva 91/271/CEE, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas.
- Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de aguas residuales.
- Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Resolución de 23 de febrero de 2023, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente, por lo que se declaran las zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias.
- Norma alemana ATV-A131. Dimensionamiento de plantas de fangos activos de una etapa. (2000)

1.5.2 Programas informáticos

- *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)*
- Microsoft Word
- Microsoft Excel
- Otros programas utilizados⁷

1.5.3 Plan de gestión de calidad aplicado

Para garantizar el nivel adecuado de calidad en el tratamiento de las aguas residuales del municipio de El Catllar, se ha seguido un plan de gestión de calidad específico para los equipos e instrumentación utilizados en la elaboración de este proyecto. A continuación, se describen las acciones clave dentro de este plan:

- Calibración de sondas.
- Análisis de muestras de agua.
- Uso de equipos de proyecto.

⁷ El resto de los programas que han sido utilizados son confidenciales.

1.5.4 Bibliografía

Chamorro Alonso, J.E. Otros procesos de fangos activos: doble etapa, estabilización-contacto, aeración prolongada y procesos secuenciales. Publicación "Tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras" del Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana - CEDEX.

Cortacáns Torre, J. A. (1997). Investigación sobre la eliminación simultánea de nutrientes por vía biológica [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid.

Del Castillo González, I. Tratamientos biológicos de fangos activos: Aspectos generales y procesos convencionales. Publicación "Tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras" del Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana - CEDEX.

González, S (2022). Parámetros de diseño en plantas de tratamiento de aguas. Cadagua.

La Iglesia Gandarillas Suez, Jaime. Dimensionamiento de una depuradora de aguas residuales (EDAR). Publicación "Tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras" del Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana - CEDEX.

Larrea Urcola, L. Fundamentos de eliminación de nitrógeno y fósforo en procesos de fangos activos. Publicación "Tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras" del Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana - CEDEX.

Ortega E, Ferrer Y, Salas J, Aragón C y Real A. (s.f.) Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Salas Rodríguez, Juan José. et al. Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Sevilla: Centro de Nuevas Tecnologías del Agua CENTA, 2007.

Trillo Fox, I. Sistemas de aireación. Técnicas aplicables al diseño y gestión. Publicación "Tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras" del Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana - CEDEX.

1.5.5 Otras referencias

Aerzen (2015). Manual compresor de émbolos rotativos Delta Hybrid.

Aerzen, E. (2022, 20 marzo). *Delta Hybrid: la eficiencia como principio en la tecnología de compresores*. Blog Aerzen Ibérica. <https://blog.aerzen.es/delta-hybrid-la-eficiencia-principio-la-tecnologia-compresores/>

Amoníaco y amonio | Hach | Descripción general de los parámetros del agua. (s. f.). <https://es.hach.com/parameters/ammonia>

Chamorro, J. (2023, 2 marzo). Recomendaciones para el diseño de aireaciones prolongadas. iAgua. <https://www.iagua.es/blogs/jorge-chamorro/recomendaciones-diseno-aireaciones-prolongadashttps://www.iagua.es/>

González, M. J. (2024, 19 abril). El impacto en España de la nueva directiva europea de aguas residuales. *iAgua*. <https://www.iagua.es/blogs/manuel-j-gonzalez/impacto-espana-nueva-directiva-europea-aguas-residuales>

Hipermapa. (s.f.). https://sig.gencat.cat/visors/VISOR_ACA.html

New Delta Hybrid sizes: Maximum energy efficiency, minimum TCO. (2023, 25 enero). Aerzen Relaunch. <https://www.aerzen.com/news/releases/pressarticle/new-delta-hybrid-sizes-maximum-energy-efficiency-minimum-tco>

Visor SIGPAC. (s. f.-b). <https://sigpac.mapa.gob.es/feqa/visor/>

1.6 Definiciones y abreviaturas

1.6.1 Definiciones

- Bacterias facultativas: Son aquellas bacterias que pueden vivir bajo condiciones de presencia o ausencia de oxígeno, usando otras rutas metabólicas que no requieren el oxígeno.
- Carga másica: Relación entre la carga de materia orgánica que entra en el reactor biológico al día y la masa de microorganismos existentes en el mismo.
- Caudal máximo: Es el valor máximo de caudal que accede al tratamiento de la EDAR. Este valor se suele alcanzar cuando se producen lluvias.
- Caudal medio: Es el caudal medio en 24 horas.
- Caudal punta: Es el caudal máximo que se da en un día en tiempo seco.
- Habitantes equivalentes: Medida utilizada en el tratamiento de aguas residuales para expresar la carga orgánica generada por una población humana en una planta de tratamiento. Representa la cantidad de materia orgánica producida por una persona en un día.
- Nitrógeno Kjeldahl: Es la suma de las formas de nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal. ($NTK = N - N_{org} + N - N_{NH4}$)
- Nitrógeno total: Es la suma del nitrógeno Kjeldahl, el nitrógeno nitroso y el nitrógeno nítrico. ($N_T = NTK + N - N_{NO2} + N - N_{NO3}$)
- Proceso aerobio: Proceso que se lleva a cabo en presencia de oxígeno, debido a que los microorganismos actuantes en la conversión lo necesitan para su metabolismo. El más común es el proceso de fangos activos.
- Proceso anaeróbico: Procesos que se dan en ausencia de oxígeno (con valores muy por debajo de 0.1 mg/L de O_2). Este tipo de microorganismos no necesitan oxígeno para su metabolismo.
- Proceso anóxicos: Procesos en los que los microorganismos en la conversión de la materia orgánica metabolizan el nitrógeno de los nitratos en nitrógeno gas, en ausencia de oxígeno.
- Tiempo de retención hidráulico: Parámetro que mide la relación expresada en horas entre el caudal a tratar y el volumen del reactor biológico, en el tratamiento de aguas residuales.
- Vehiculadores: Agitadores de baja velocidad que garantizan la circulación del flujo manteniendo en suspensión los flóculos del licor mezcla.

1.6.2 Abreviaturas

- αOC : Transferencia de oxígeno de una instalación de aeración.
- $\theta_{c,dim}$: Edad del fango para procesos que requieren estabilización aerobia y nitrificación. (días)
- b : Coeficiente de descomposición de los microorganismos.
- C_{DBO5} : Concentración de DBO_5 .
- C_N : Concentración de nitrógeno total.
- $C_{Norg,SDS}$: Concentración de nitrógeno orgánico en la salida del clarificador. ($C_{Norg,SDS} = C_{NTK} - S_{NH4}$) (mg/L)
- C_m : Carga másica. (Kg DBO_5 /Kg MLSS ·d)
- C_x : Concentración de oxígeno en el reactor biológico (mg/L)
- C_s : Concentración de saturación. (mg/L)
- $C_{SS,T}$: Valor de saturación estándar. (mg/L)
- DBO_5 : Demanda bioquímica de oxígeno. (mg/L)
- DN : Diámetro nominal
- DQO : Demanda química de oxígeno. (mg/L)

- *EDAR*: Estación depuradora de aguas residuales.
- *ER*: Toma a la entrada del reactor biológico.
- f_c : Factor punta para la respiración de carbono.
- f_N : Factor punta para la oxidación de amonio.
- F_T : Factor de temperatura para la respiración endógena.
- F_e : Caudal diario a purgar. (kg/día)
- *MLSS*: Concentración de fangos activados o concentración del licor mezcla. (kg/m³)
- *NTK*: Nitrógeno total Kjeldahl. (mg/L)
- *NTU*: Unidad nefelométrica de turbidez.
- $OC_{d,C}$: Consumo diario de oxígeno para la eliminación de carbono. (kg/d)
- $OC_{d,D}$: Consumo diario de oxígeno para la eliminación del carbono que se cubre con la desnitrificación. (kg/d)
- *OD*: Oxígeno disuelto
- $OC_{d,N}$: Oxígeno consumido por día para la desnitrificación. (kg/d)
- OC_h : Consumo horario de oxígeno. (kg/h)
- Q_d : Caudal diario de entrada a planta. (m³/d)
- R_{ALK} : Requerimiento de alcalinidad. (mg/L CaCO₃)
- $S_{DQO,inert,SDS}$: Concentración de salida de la fracción soluble inerte. (mg/L)
- S_{NH_4} : Concentración de nitrógeno amoniacal. (mg/L)
- $S_{NO_3,SDS}$: Concentración de salida de nitrógeno en forma de nitratos en el efluente del decantador secundario. (mg/L)
- *SBR*: Sequencing Batch Reactor.
- *SDS*: Toma a la salida del decantador secundario.
- *SS*: Sólidos en suspensión. (mg/L)
- $SNO_{3,D}$: Nitratos por desnitrificar. (mg/L)
- *T*: Temperatura. (°C)
- V_{AT} : Volumen del reactor biológico. (m³)
- V_D : Volumen de desnitrificación. (m³)
- V_N : Volumen de nitrificación. (m³)
- $X_{DQO,FE}$: Fango producido medido como DQO (mg/L)
- $X_{Norg,FE}$: Concentración de nitrógeno incorporado en la biomasa que sale con los fangos en exceso. (mg/L)
- X_P : Concentración de sólidos en el fango purgado (kg/m³)
- *Y*: Factor de producción (mg biomasa formada expresada como DQO por mg de DQO biodegradado.)

1.7 Requisitos de diseño

En el presente proyecto, como se ha mencionado anteriormente, se estudiará la viabilidad de automatizar la aireación del tratamiento secundario de la estación depuradora del municipio de El Catllar, con el objetivo de optimizar su funcionamiento y, por ende, reducir el consumo. Para ello, debido al sobredimensionamiento del reactor y a las cargas de entrada de diseño, será necesario, en primer lugar, obtener los volúmenes teóricos de nitrificación y desnitrificación mediante los caudales actuales de entrada a planta y verificar que se dispone de volumen suficiente para las reacciones que se deben llevar a cabo en el reactor existente. Una vez obtenidos los volúmenes, se procederá a realizar el cálculo de la demanda de oxígeno necesaria para esas condiciones de entrada. Utilizando el cálculo del oxígeno necesario, los volúmenes ocupados por cada zona y las especificaciones de la soplante en funcionamiento, se determinará el tiempo que deben estar en marcha en cada fase, el cual se pondrá a prueba mediante la monitorización de parámetros a través de sondas de medición del ion amonio y nitrato controlando el oxígeno disuelto suministrado.

El proyecto se llevará a cabo teniendo en cuenta que el agua tratada devuelta al medio deberá cumplir con la calidad establecida tanto en la Directiva 91/271/CEE como en el REAL DECRETO 509/1996, de 15 de marzo, que desarrolla el Real Decreto Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el cual se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales.

1.7.1 Características del agua de entrada

El agua que llega a planta es de procedencia 100% urbana. En la Tabla 5, se detalla la carga contaminante actual del agua de entrada al tratamiento secundario. Que como se puede apreciar, es significativamente inferior a la del proyecto de diseño (Véase Tabla 4).

Tabla 5. Características del agua de entrada de la planta

Parámetro	Concentración agua de entrada (mg/L) *
SS	158
DQO	433
DBO ₅	169
Nitrógeno total	78.1
Fósforo total	6.4

Nota (*): Estas concentraciones son variables, los datos presentados es un promedio de los valores desde julio de 2023 a abril de 2024.

1.7.2 Limitaciones del agua de salida

Como se ha mencionado anteriormente, la composición del agua de salida una vez completado el proceso de tratamiento debe cumplir con las limitaciones legales establecidas por la Directiva española.

Tabla 6. Características del agua de entrada de la planta

Parámetro	Concentración agua salida (mg/L)	Porcentaje mínimo de reducción
SS	35	70-90%
DQO	125	75%
DBO ₅	25	70-90%
Nitrógeno total	15	70-80%
Fósforo total	2	80%

1.8 Descripción del proceso

A continuación, se presenta la descripción de la línea de agua del sistema de tratamiento existente en la depuradora, con un enfoque principal en el tratamiento secundario, que es el objeto de este proyecto.

1.8.1 Pretratamiento

El caudal de agua proveniente de los colectores en alta del sector sudoeste del municipio es conducido a la planta a través de una tubería de DN 500 de PEAD. Esta tubería recoge las aguas residuales hasta la entrada del pretratamiento, que se encarga de recibir las aguas de la población y separar los residuos más gruesos mediante una serie de procesos físicos.

En la primera etapa, se encuentra el pozo de gruesos o pozo de entrada, donde las arenas, gravas y sólidos de gran tamaño sedimentan rápidamente por su propio peso y son retirados posteriormente mediante una cuchara bivalva. Antes de ser bombeada, el agua pasa a través de una reja automática de tamizado de 10 mm de paso que retiene los sólidos en el pozo. Posteriormente, el agua es bombeada mediante un grupo de bombas centrífugas sumergidas hasta una cota suficientemente elevada para permitir que fluya por gravedad en el resto de las unidades del proceso.

El segundo proceso físico consiste en el canal de desbaste, donde se realiza la separación de sólidos gruesos seguido de la separación de sólidos finos. En primer lugar, se separan los sólidos gruesos de medida superior a 6 mm a través de una reja automática. Seguidamente, se separan los sólidos finos, de tamaño superior a 3 mm, a través de un tamiz automático. Los residuos se recogen a través de un tornillo transportador-compactador y se almacenan en un contenedor.

Para completar la unidad de pretratamiento, el agua pasa por un tanque desarenador-desengrasador, donde las arenas finas se separan por sedimentación y las grasas por flotación, mediante la inyección de aire a través de difusores y un grupo de soplantes.

En cuanto al tratamiento primario, es importante destacar que en este tipo de procesos no se precisa de una decantación primaria, ya que el agua del reactor se mantiene en constante movimiento y aireación, lo que evita la sedimentación de los sólidos y permite a los microorganismos degradar eficientemente la materia orgánica, simplificando el proceso al eliminar esta etapa.

1.8.2 Tratamiento secundario

1.8.2.1 Reactor biológico

Una vez finalizado el pretratamiento, el agua residual es dirigida por gravedad hacia el tratamiento secundario, el cual se inicia con el tratamiento biológico y finaliza con la decantación secundaria. Actualmente, en la EDAR, el tratamiento biológico está configurado para funcionar en modo SBR o "modo fases", estableciendo el modo carrusel⁸ o "sin fases" como modo de funcionamiento de emergencia.

A continuación, se describen de manera resumida las fases del proceso del reactor biológico en modo SBR:

⁸ Modo carrusel o sin fases se refiere al modo de funcionamiento inicial que tenía el reactor antes de realizarse la adaptación a SBR.

FASE 0: INICIO PROCESO

Durante esta fase, el sistema permanece en reposo a la espera de las condiciones para iniciar la fase de carga. Los vehiculadores, soplantes y bomba de evacuación se encuentran parados.

FASE 1: FASE CARGA

La fase de carga se activa cuando se alcanza el nivel mínimo requerido en el pozo de entrada. Durante esta fase, el sistema inicia automáticamente el funcionamiento de la primera bomba para comenzar a llenar el reactor. La fase de carga concluye cuando se detecta que se ha alcanzado el nivel mínimo del pozo, se agota el tiempo establecido por el usuario o se llega a un nivel máximo de seguridad.

FASE 2: FASE AIREACIÓN

La etapa de aireación tiene lugar una vez finaliza la fase de carga. Durante esta fase, se llevan a cabo principalmente las reacciones de nitrificación y degradación de la materia orgánica. Los agitadores siguen en funcionamiento para mantener el licor mezcla en movimiento. Esta fase finaliza al alcanzar el tiempo establecido por el usuario.

FASE 3: FASE DECANTACIÓN

Se inicia al finalizar la fase de aireación y se detienen tanto las soplantes como los vehiculadores. Esta fase tiene una duración mínima y finaliza cuando se alcanza la turbidez mínima establecida por el usuario. En esta fase se llevan a cabo las reacciones de desnitrificación.

FASE 4: DESCARGA

La fase de descarga comienza al finalizar la fase de decantación y termina cuando se cumple con el nivel mínimo o la turbidez supera el valor máximo fijado.

RECIRCULACIÓN:

La recirculación, con duración programable por el usuario, solo tiene lugar durante la fase de carga.

PURGA:

La purga del reactor biológico es semiautomática y se realiza durante la fase de aireación en el momento indicado por el usuario.

1.8.2.2 Decantador secundario

Una vez finalizado el tratamiento biológico, el agua tratada del reactor biológico es dirigida hacia un decantador secundario, donde se lleva a cabo la separación de la fracción sólida del licor mezcla mediante el proceso de decantación por gravedad. En este proceso, los sólidos se depositan en el fondo del tanque, mientras que el agua clarificada se sitúa en la parte superior.

1.8.2.3 Obra de salida

Finalmente, el agua tratada proveniente de la decantación secundaria es dirigida hacia una arqueta de salida, que cuenta con una zona de acumulación de agua. Desde allí, unas bombas impulsan una parte hacia el sistema de filtración para su aprovechamiento como agua de servicio. El resto fluye hacia una rampa revestida con chapa de acero inoxidable, que actúa como fuente de presentación. Por último, las aguas son canalizadas a través de una conducción

por gravedad para su vertido en el Barranc de la Mora, área no catalogada como zona sensible.⁹

1.9 Parámetros operativos

La mayoría de los sistemas aerobios para el tratamiento de aguas residuales contienen microorganismos capaces de nitrificar (Nitrosomas, Nitrobacter, Nitrosococcus) y desnitrificar (Alcaligenes, Paracoccus, Pseudomonas, etc.), siempre y cuando las condiciones de tiempo de retención celular y temperaturas sean adecuadas.

A continuación, se presentan los parámetros operativos que de manera más relevante controlan la eliminación de nitrógeno por vía biológica.

Además, considerando que los valores de algunos parámetros se calculan a partir de los valores de diseño, como las cargas contaminantes y los caudales de entrada, se han calculado los valores correspondientes a los flujos que actualmente entran a planta. Sin embargo, para algunos cálculos, se han utilizado datos de diseño, como el volumen del reactor, ya que la planta ya está construida.

1.9.1.1 Temperatura

El proceso para eliminar biológicamente el nitrógeno depende altamente de la temperatura. A medida que disminuye la temperatura, la tasa de nitrificación se reduce, siendo muy difícil la nitrificación a temperaturas inferiores a 10 °C¹⁰, debido a que se inhibe el crecimiento de Nitrobacter, lo que produce una acumulación de iones nitritos.

1.9.1.2 Concentración de oxígeno disuelto

La concentración de oxígeno disuelto es un factor limitante considerando que las bacterias nitrificantes son aerobias. La actuación de estas bacterias está regulada por la presencia de oxígeno, definiendo las zonas de nitrificación y desnitrificación en el medio. El valor de referencia de oxígeno en la zona aerobia se encuentra alrededor de 1.5-2 mg/L. El crecimiento puede inhibirse si la concentración de oxígeno cae a niveles muy bajos (por debajo de 0.5 mg/L)¹¹, ya que el oxígeno se vuelve limitante para la respiración.

1.9.1.3 Alcalinidad

Las bacterias nitrificantes son muy sensibles a pH inferiores a 7. La nitrificación es un proceso que acidifica el sistema, provocando consumo de alcalinidad y reduciendo la velocidad de la reacción. Para prevenir esta reducción, primero se ha calculado el requerimiento de alcalinidad del sistema para compararlo con el que actualmente se dispone.

La oxidación de 14 gramos de nitrógeno amoniacal produce 2 iones de H⁺ (acidez) que consumen 2 equivalentes de alcalinidad (bicarbonato) del agua residual. Considerando que 1 equivalente de alcalinidad corresponde a 50 g/L de CaCO₃, se obtiene que 1 mg de nitrógeno amoniacal oxidado consume 7.14 mg/L de CaCO₃ del agua residual. Dado que en el reactor también se produce la desnitrificación, se obtendrá una recuperación de alcalinidad en función de la cantidad de nitrato desnitrificado. Teniendo en cuenta lo consumido por la nitrificación y que se producen 3.57 gramos de CaCO₃ por gramo de N-NO₃ desnitrificado se obtiene que el requerimiento de alcalinidad para este proceso es de 372.91 mg/L de CaCO₃.

⁹ Hipermapa. (s.f.). https://sig.gencat.cat/visors/VISOR_ACA.html

¹⁰ Norma alemana ATV-A131.

¹¹ Cortacáns Torre, J. A. (1997). Investigación sobre la eliminación simultánea de nutrientes por vía biológica [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid.

1.9.1.4 Carga másica:

La carga másica se define como la relación entre la materia orgánica que entra en el reactor por unidad de tiempo y la cantidad de microorganismos existentes en el mismo. Los reactores que llevan a cabo la aireación prolongada, al operar con altas edades de fango, presentan cargas másicas de valores muy bajos.

Cuando la carga másica es baja, como en el caso de la aireación prolongada, los microorganismos presentes en el reactor biológico tienen menos alimento disponible, lo que desencadena un proceso de metabolismo endógeno. Al crecer más lentamente debido a la escasez de alimento, los microorganismos no se ven sobrecargados y pueden dedicar más tiempo a metabolizar completamente los contaminantes, lo que les permite degradar de manera más completa y eficiente la materia orgánica presente en el agua residual.

1.9.1.5 Tiempo de retención hidráulico:

En los procesos de aireación prolongada, se debe tener en cuenta que, al tener una carga másica baja, el tiempo de residencia hidráulico del bloque de agua que entra en el reactor debe ser elevado. Esto se debe a que la biomasa necesita más tiempo para procesar la cantidad limitada de materia orgánica presente en el reactor.

1.9.1.6 Edad del fango:

La edad del fango (*Sludge Retention Time* o *SRT*) es un parámetro fundamental en el diseño y control de un sistema de fangos activos, dado que está estrechamente relacionado con la tasa de crecimiento de los microorganismos. Los reactores utilizados para la eliminación de nutrientes requieren una edad del fango elevada, debido a que las bacterias encargadas de la nitrificación y desnitrificación presentan una tasa de crecimiento máxima baja, lo que las convierte en bacterias de crecimiento lento. Por lo tanto, se necesita trabajar con edades del fango entre 20-30 días, según varias fuentes bibliográficas consultadas.¹²

En la planta se han experimentado diferentes modos de operación. Desde julio de 2023 hasta enero de 2024, el sistema operaba en modo carrusel. A partir de febrero de ese mismo año, se comenzó a trabajar en modo SBR. El conocimiento del punto de partida ha ayudado a ajustar la edad del fango adecuada para este proceso. Además, es importante tener en cuenta que una edad del fango elevada puede ser contraproducente, ya que los microorganismos de mayor edad, que necesitan mayor cantidad de oxígeno para mantener un rendimiento óptimo y están más desarrollados, compiten con los más jóvenes dificultando su desarrollo. Además, puede llevar a problemas de sedimentación deficiente de los flóculos. Para garantizar que se dispone de una edad adecuada pero no excesiva para el crecimiento de las bacterias nitrificantes y desnitrificantes, se decidió mantener una edad fija de 30 días, siendo este valor superior al teórico calculado y situándose entre los rangos bibliográficos⁴.

1.9.2 Capacidad de la zona aerobia y anóxica del reactor

Para determinar si el reactor existente cuenta con capacidad suficiente para llevar a cabo las reacciones de nitrificación y desnitrificación, se ha realizado el cálculo de los volúmenes mínimos teóricos de la zona anóxica y aerobia siguiendo el procedimiento establecido por la norma alemana ATV-A131. Una vez determinado el volumen que debería ocupar cada zona, se ha llevado a cabo la verificación de los resultados con el volumen real del reactor ubicado en la planta. Esta comprobación se realizó mediante la medición del oxígeno en varios puntos.

¹² Tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras" del Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana - CEDEX.

Según los valores obtenidos, se puede concluir que se dispone de volumen suficiente para llevar a cabo la reacción de nitrificación. En cuanto al volumen anóxico, se determinó que parte de este se logra en la fase de aireación cuando el agua recorre la zona anóxica, y el resto se obtiene en las fases posteriores, donde no hay aportación de oxígeno.

1.9.2.1 Volumen de fango a retirar del sistema

Para mantener la edad del fango de 30 días dentro del reactor y prevenir la acumulación excesiva de lodo, es necesario realizar purgas periódicas.

La extracción del caudal de purga del reactor biológico se lleva a cabo mediante una bomba centrífuga sumergible equipada con un motor de 2.2 kW de potencia nominal. Esta bomba se encarga de impulsar el agua hasta la arqueta de salida del reactor a través de una manguera corrugada de PVC reforzado.

Considerando que se debe mantener una edad del fango de 30 días y una concentración de sólidos en el licor mezcla situada entre los valores bibliográficos¹³, se ha determinado el tiempo específico requerido para purgar un cierto volumen de fango, teniendo en cuenta la capacidad de la bomba mencionada anteriormente. Las purgas se realizarán de forma semiautomática durante la fase de aireación del ciclo, garantizando así una mezcla completa.

1.10 Optimización del sistema de aireación

1.10.1 Necesidad teórica de oxígeno del sistema

Como se ha mencionado en reiteradas ocasiones, el diseño del proceso se realizó considerando un caudal y cargas contaminantes superiores a los que actualmente están ingresando en planta. Por lo tanto, para optimizar el sistema de aireación del tratamiento secundario, es esencial determinar la demanda de oxígeno necesaria para alcanzar el rendimiento deseado.

La demanda de oxígeno en el reactor biológico depende principalmente de los procesos biológicos que tienen lugar en su interior. En este caso, la demanda de oxígeno se debe a la eliminación de carbono (crecimiento y respiración endógena), las reacciones de nitrificación y el ahorro de oxígeno asociado a la desnitrificación. La demanda de oxígeno de las reacciones de nitrificación se ha calculado considerando que por cada kilogramo de N_{NO_3} formado se consumen 4.57 kgO₂. En el caso de la desnitrificación, se estima estequiométricamente que se recuperan unos 2.86 kg de O₂ por kilogramo de N_{NO_3} reducido.¹⁴

Tras realizar los cálculos, se ha obtenido, como era de esperar, que la demanda teórica de oxígeno tiene un valor significativamente inferior al valor obtenido en el proyecto de diseño.

1.10.2 Demanda de aire

Originalmente, el sistema de aireación estaba formado por tres soplantes de 30 kW cada una (2+1R). Sin embargo, junto con la modificación del reactor a SBR, se sustituyó uno de los equipos por otro de menor capacidad (22 kW). Actualmente, dado los caudales y las cargas contaminantes de entrada, así como la demanda de oxígeno necesaria, el funcionamiento de

¹³ Tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras" del Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana - CEDEX.

¹⁴ La Iglesia Gandarillas Suez, Jaime. Dimensionamiento de una depuradora de aguas residuales (EDAR). Publicación "Tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras" del Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana - CEDEX.

esta soplante es suficiente para satisfacer los requerimientos de eliminación, por lo que el estudio se centra en este equipo.

La difusión del aire al interior del reactor se realiza mediante cuatro parrillas elevables con un total de 252 difusores de disco de burbuja fina de 12", cada uno con una capacidad de trabajo de 1 a 10 Nm³/h.

La demanda de oxígeno obtenida en el apartado anterior corresponde a las necesidades teóricas de oxígeno. Para determinar el caudal real de aire que debe suministrar la soplante, se debe tener presente que la transferencia de oxígeno por parte de los difusores no tiene un rendimiento del 100%. Este rendimiento depende de:

- El caudal por difusor: Un menor caudal de aire aumenta la eficiencia de transferencia de oxígeno al reducir la velocidad de ascenso de las burbujas de aire y minimizar la coalescencia entre ellas.
- La profundidad de los difusores: A mayor profundidad, la presión hidrostática incrementa, aumentando la solubilidad del oxígeno. Además, una mayor profundidad prolonga el tiempo de residencia de las burbujas de aire en el agua, mejorando la transferencia de oxígeno.
- La densidad del difusor: Una mayor densidad de difusores mejora el rendimiento del sistema al incrementar la cantidad de burbujas de aire generadas y la superficie de contacto entre el aire y el agua.

La demanda real de aire que deben suministrar las soplantes se ha calculado considerando la necesidad teórica de oxígeno obtenida anteriormente y utilizando el gráfico de rendimiento de los difusores proporcionado por el fabricante. El valor de esta demanda ha sido significativamente inferior al calculado en el proyecto de diseño.

1.10.3 Soplante D19S

La soplante D19S es del tipo émbolos rotativos Delta Hybrid. El término "Delta Hybrid" surge de la combinación entre las tecnologías de las soplantes de émbolos rotativos y los compresores de tornillo. Esta fusión, ofrece ventajas como un menor costo de inversión en comparación con los compresores de tornillo convencionales. Proporciona una mayor eficiencia energética gracias a la implementación de nuevos perfiles de rotores y motores con mayor clase de eficiencia diseñados para minimizar las pérdidas de energía. Además, se beneficia de una reducción en las necesidades de mantenimiento debido a un sellado más efectivo, rodamientos con una vida útil prolongada y un sistema de aceite inteligente.

El diseño mecánico presenta un perfil de rotor 3+4 con compresión interna específicamente diseñado para aplicaciones de elevada presión diferencial, de hasta 1500 mbar. Con este diseño, el aire se comprime eficientemente en la cámara de compresión a medida que los rotores giran, reduciendo el volumen de la cámara y generando un flujo de aire constante y sin pulsaciones.

Las soplantes están alimentadas por variadores de frecuencia, los cuales pueden regular el caudal de aire según las necesidades de oxígeno del sistema permitiendo una operación más eficiente y precisa.

A continuación, se presentan dos figuras que muestran la configuración interna de la parte mecánica de este tipo de soplantes:

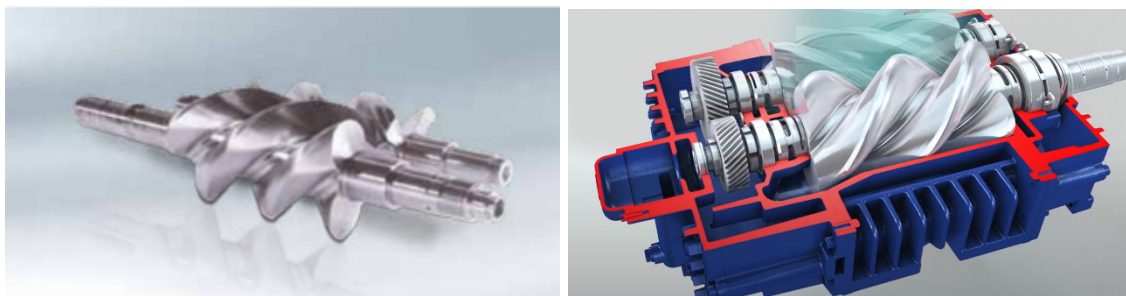


Figura 7. Perfil del rotor 3+4 de la soplante Delta Hybrid.¹⁵

1.10.4 Tiempos de funcionamiento de la soplante

Dado que el fabricante no proporcionó información detallada sobre la curva característica de la soplante instalada, se optó por representar el caudal máximo y mínimo proporcionado en función de la frecuencia del motor. Con esto, se ha podido determinar de manera aproximada el caudal que la soplante debería proporcionar a la frecuencia actual de operación.

Interpolando los valores máximo y mínimo de caudal para una frecuencia de 38 Hz, se ha obtenido el caudal de aire que debe proporcionar la soplante. Con este valor y el caudal de aire diario que demanda el proceso para la reducción de nutrientes y materia orgánica, se obtiene que el tiempo de funcionamiento diario de las soplantes es superior al tiempo de aireación utilizado con anterioridad a este proyecto.

En la fase inicial del proyecto, de acuerdo con los análisis realizados por el laboratorio homologado, el agua tratada cumplía con los límites de vertido con un tiempo de aireación de inferior al obtenido teóricamente¹⁶. La discrepancia en los valores podría atribuirse al hecho de que los cálculos se realizaron para tratar una carga de entrada de 300 m³/día. Sin embargo, considerando que el reactor tiene una capacidad de 3195 m³, el proceso presenta acumulación del agua del entrada con un tiempo de residencia hidráulico elevado. Esto provoca una mezcla en el interior del reactor entre el bloque de agua no tratada, que contiene una concentración de nitrógeno total por encima del límite de vertido, y una masa de agua tratada con una concentración de nitrógeno total inferior a 15 ppm.

Dado que el objetivo del proyecto es optimizar el sistema de aireación y se han identificado múltiples inconvenientes durante el proceso, se ha decidido dejar el cálculo teórico como referencia de tiempo máximo de aireación. En su lugar, se llevarán a cabo ensayos de prueba y error para determinar el tiempo mínimo de funcionamiento de la soplante. Este tiempo de trabajo estará limitado por el cumplimiento de los límites de vertido.

1.10.4.1 Configuración del ciclo de operación

Una vez establecida y controlada la edad del fango que asegura el crecimiento de la población bacteriana encargada de realizar las reacciones de nitrificación y desnitrificación, como se mencionó anteriormente, se han llevado a cabo pruebas utilizando el método de ensayo y error para determinar el tiempo de funcionamiento óptimo de la soplante.

Para esto, en primer lugar, se estableció un tiempo de aireación y se analizaron las muestras tomadas para evaluar la calidad del efluente. En base a los resultados obtenidos, se fue ajustando la duración de la etapa de aireación hasta obtener el tiempo mínimo que permitía cumplir con las limitaciones de vertido.

¹⁵ Aerzen (2015). Manual compresor de émbolos rotativos Delta Hybrid. Recuperado 20 de abril de 2024, de D1-010-05-ES_Web.pdf (aerzen.com)

¹⁶ Valor extraído de los informes generados por un programa.

Después de analizar los resultados obtenidos, se observó, como era de esperar, que a menor tiempo de funcionamiento de las soplantes, mayor es la concentración de nitrógeno presente en la salida. Considerando que se debía cumplir con los límites de vertido, se logró reducir un 33.3% el tiempo de funcionamiento de las soplantes por ciclo.

1.10.4.2 Ahorro energético y reducción de emisiones de CO₂

Una vez obtenido el tiempo de funcionamiento óptimo de la soplante, es posible calcular el ahorro energético resultante de la reducción del tiempo de operación. Para ello, se ha realizado una comparación entre la energía consumida anteriormente y la consumida con el nuevo tiempo establecido. En base a los datos obtenidos, se estima que al reducir el tiempo de aireación de las soplantes en cada fase, se puede lograr un ahorro del 20.5 %.

Debido a que la depuradora de El Catllar utiliza energía que proviene en parte de autoabastecimiento mediante placas solares y otra parte de energía renovable comprada, no se ha calculado el ahorro de emisiones de CO₂ que tendría la reducción en el consumo energético, ya que la depuradora no genera emisiones de CO₂ en su funcionamiento al no depender de combustibles fósiles en su funcionamiento.

1.10.5 Monitorización del sistema de aireación

Con la finalidad de estudiar la viabilidad de la automatización del sistema de aireación para permitir que trabaje en función de la demanda de oxígeno requerida según la carga contaminante que está entrando a planta, en este apartado se presenta la monitorización de algunos de los parámetros clave en el proceso durante la fase de aireación y decantación del ciclo.

1.10.5.1 Comportamiento de las formas de nitrógeno

En medios acuosos, el amoníaco se presenta en dos formas químicas: como amoníaco gaseoso (NH₃) y como ion amonio (NH₄⁺), manteniendo un equilibrio químico dependiente del pH. La ecuación química que rige la relación entre el amoníaco y el amonio es la siguiente:



Este equilibrio se desplaza hacia la derecha en condiciones de pH bajo y hacia la izquierda cuando es alto. A temperatura ambiente, con un pH inferior a 6, la proporción de amoníaco en forma de NH₃ es mínima y la mayor parte del nitrógeno amoniacal se encuentra en forma de NH₄⁺. A un pH alrededor de 8, la proporción de NH₃ es del 10% o menos, mientras que a un pH ligeramente superior a 9, esta proporción aumenta alrededor del 50%. Cuando el pH supera un valor de 11, todos los iones de amonio en la solución se presentarán en forma de amoníaco. La actividad del amoníaco acuoso también disminuye considerablemente a temperaturas bajas.¹⁷

La nitrificación constituye el primer paso del proceso de eliminación de nitrógeno, en el cual bacterias como los Nitrosomas oxidan el ion amonio a nitrito. Posteriormente, el nitrito se oxida rápidamente a nitrato por las Nitrobacter. Ambos tipos de bacterias son aeróbicas y requieren oxígeno para su metabolismo. Por lo tanto, el control del oxígeno disuelto es esencial en este proceso.

La segunda etapa es la desnitrificación, en la cual bacterias facultativas reducen el nitrato a nitrógeno gas. Estas bacterias pueden utilizar el oxígeno presente en el nitrato en condiciones de anoxia.

¹⁷Amoníaco y amonio | Hach | Descripción general de los parámetros del agua. (s. f.). <https://es.hach.com/parameters/ammonia>

En la Figura 8, se muestra la tendencia que sigue el amonio y nitrato en función de la presencia o ausencia de oxígeno. Se observa cómo el ion amonio disminuye a medida que se introduce aire en el sistema, mientras que el nitrato se forma en esta fase aeróbica. Una vez finalizada la fase de aireación se aprecia que, en ausencia de aire, el nitrato se reduce debido a que este compuesto se transforma en nitrógeno gas. En cuanto al amonio, su concentración se mantiene estable.

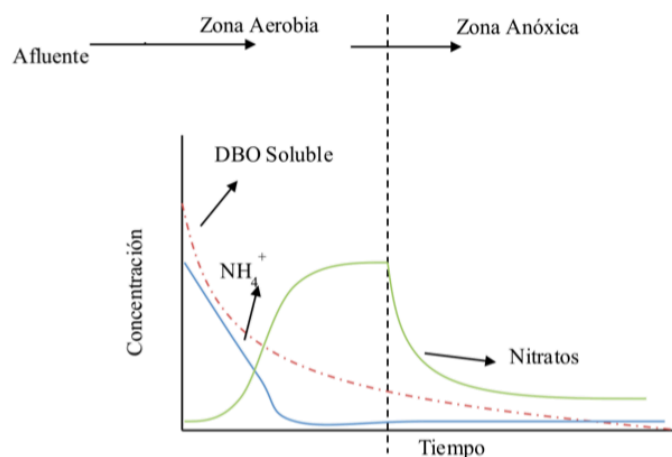


Figura 8. Comportamiento del amonio y nitrato en función del tiempo y la incorporación de aire.¹⁸

1.10.5.2 Instrumentos de medición

Con el propósito de evaluar la viabilidad de automatizar las soplantes basándose en los valores obtenidos mediante las sondas disponibles en planta y evitar el funcionamiento temporizado, se ha optado por llevar a cabo la monitorización de los parámetros clave del proceso. El objetivo principal de esta monitorización es controlar el comportamiento de estos compuestos durante la fase aeróbica y anóxica del ciclo, ya que como se ha comentado anteriormente, representan un papel fundamental en los procesos con eliminación de nitrógeno.

Las sondas disponibles en planta y que se utilizarán en caso de que sea posible la automatización son las siguientes:

- Sonda de Amonio y Nitratos (ANISE): Sensor de amonio y nitrato que mide mediante electrodos selectivos ISE con compensación de interferencias por cloruro y potasio.
- Sonda de oxígeno disuelto (LDO): Sensor de oxígeno disuelto que mide por luminiscencia.

1.10.5.3 Monitorización

La monitorización de los parámetros se realizó utilizando las sondas disponibles en planta. Durante este proceso, se mantuvo una concentración de oxígeno disuelto adecuada para asegurar la actividad de los microorganismos. El seguimiento del comportamiento de los compuestos durante las fases de aireación y decantación se realizó mediante un software de visualización de datos que permite crear paneles de control personalizados para analizar y supervisar los resultados mediante gráficos.

¹⁸ Venegas Martínez, C.B. (2015). Eliminación biológica de nutrientes en aguas residuales con alto contenido de nitrógeno amoniacal utilizando un reactor biológico secuencial. [Tesis Doctoral]. Universidad de Cantabria.

Los gráficos obtenidos durante la monitorización indican que la evolución de los compuestos seleccionados, en presencia de oxígeno corresponden con la tendencia esperada comentada anteriormente. Al suministrar oxígeno, se observa que el amonio presente disminuye y, debido a la oxidación de este, se forman los nitratos.¹⁹ En cuanto a la evolución del nitrato durante la fase anóxica, se ha observado como este disminuye indicando que se están realizando correctamente las reacciones de desnitrificación.

1.10.5.4 Definición de las consignas de la automatización

Según lo establecido en la Directiva 91/271/CEE, el nitrógeno total en el agua de salida de planta debe tener una concentración máxima de 15 mg/L. Este nitrógeno está formado por todas las formas de nitrógeno presentes en el agua:

$$N_T = N - NH_4 + N_{org} + N - NO_3 + N - NO_2$$

El nitrógeno orgánico es un compuesto refractario, es decir, es resistente a la degradación y no se descompone fácilmente en formas más simples, siendo menos accesible para los microorganismos. El valor típico de la concentración de este compuesto suele estar alrededor de los 2 mg/L. Considerando esto y un valor de 1 mg/L nitrógeno nitroso ($N - NO_2$), la suma del resto de las formas puede llegar hasta los 12 mg/L.

El control de las fases aerobia y anóxica se llevará a cabo según ciertos criterios operativos establecidos, como la duración de la aireación y parada basada en valores de amonio, nitrato y turbidez, garantizando así la eficiencia operativa y la protección ambiental. Además, se requerirá un suministro de oxígeno en un rango específico para mantener las condiciones óptimas en el proceso.

NUEVA DIRECTIVA MARCO

Actualmente, se está redactando la nueva directiva marco sobre las aguas residuales, que pretende reemplazar la conocida Directiva 91/271. Uno de los cambios propuestos en esta nueva directiva es la introducción de normas más estrictas sobre los nutrientes y microcontaminantes, pudiendo llegar a limitar la concentración de nitrógeno total a 8 mg/L²⁰. Por lo tanto, aunque se ha presentado una propuesta en cuanto a las consignas de funcionamiento, en un futuro deberán modificarse para cumplir con la nueva directiva. Aun así, aunque se reduzca el límite de nitrógeno total, según las analíticas que se han ido obteniendo, la EDAR de El Catllar podría cumplir con estos valores.

1.10.5.5 Análisis de resultados

Con la monitorización de los parámetros seleccionados, se ha podido determinar la concentración del ion amonio que se debe alcanzar durante la fase de aireación para cumplir con los límites de vertido. Teniendo en cuenta esto y considerando los minutos que deben pasar para alcanzar esta concentración, se ha determinado que se podría obtener un ahorro energético de 9-38 kWh/d respecto al tiempo mínimo establecido para el funcionamiento temporizado.

¹⁹ Debido a la confidencialidad del proyecto, no es posible mostrar los resultados de la monitorización.

²⁰ González, M.J (2024, 19 abril). El impacto en España de la nueva directiva europea de aguas residuales. iAguas.

2.1 Conclusiones

La planta de tratamiento de este proyecto fue diseñada para procesar un volumen de 1000 m³/día. Sin embargo, actualmente el caudal de entrada representa una tercera parte de su capacidad de diseño. En cuanto al reactor biológico de estudio, se trata de un reactor de tipo carrusel que fue originalmente diseñado para operar con un proceso de fangos activos de aireación prolongada. Sin embargo, con el objetivo de reducir el consumo energético, la anterior empresa que operaba la planta realizó una modificación y adaptación para trabajar en modo SBR.

El objetivo principal de este proyecto era optimizar el sistema de aireación, estudiando la viabilidad de pasar del funcionamiento temporizado a automático en función de las sondas disponibles en la planta. Dado el sobredimensionamiento del reactor, se decidió, en primer lugar, recopilar nuevamente los parámetros de funcionamiento y diseño relacionados con los caudales, así como calcular la demanda actual de oxígeno.

Inicialmente, se realizó un estudio para determinar los volúmenes mínimos teóricos necesarios para llevar a cabo las reacciones de nitrificación y desnitrificación del reactor, cumpliendo con los límites establecidos por la Directiva 91/271/CEE. Una vez obtenidos los valores, se verificó mediante mediciones con una sonda de oxígeno que el volumen del reactor era mayor que el calculado. Se determinó que la zona aerobia tenía una capacidad superior a la teórica, asegurando el volumen de nitrificación. En cuanto a la zona anóxica, se concluyó que parte del volumen de desnitrificación se obtenía en la fase de aireación y el resto en la fase de decantación, donde el volumen total del reactor pasaba a tener condiciones anóxicas.

Respecto a la demanda de aire, se determinó que, para las condiciones actuales y para cumplir con los límites de vertido se requería un caudal de aire significativamente inferior al de proyecto.

La edad del fango es un parámetro esencial en el diseño y control del sistema, ya que está directamente relacionada con el crecimiento de los microorganismos responsables de la eliminación de nutrientes. Estudiando la eficiencia del proceso en función de la edad del fango a partir de las analíticas, se determinó que, para lograr un rendimiento óptimo en la eliminación de nitrógeno, se debe mantener una edad del fango de 30 días.

Una vez establecida la edad del fango adecuada, se pudo determinar el tiempo mínimo de funcionamiento de las soplantes durante la etapa de aireación. Finalmente, se concluyó que se podía operar con un tiempo un 33.3% inferior al inicial y se comprobó que, con este ajuste, se superaban los rendimientos mínimos de eliminación de contaminantes establecidos por la Directiva. La optimización tiempo de funcionamiento conlleva a un ahorro del 20.5 % en el consumo energético.

Una vez recopilados todos los resultados del proyecto, se concluye que:

- Tras monitorear el proceso, se ha observado una tendencia consistente en la cual la introducción de aire al sistema resulta en la disminución de amonio y el aumento de nitrato, tal y como se esperaba. Este comportamiento predecible confirma que el proceso podría ser controlado mediante un sistema automatizado. Esto optimizaría el tiempo de uso de oxígeno, lo que a su vez reduciría el consumo de los equipos de aireación.
- A pesar de que el caudal de entrada se mantiene estable en 200-300 m³/día, las cargas contaminantes presentan variaciones diarias, requiriendo análisis constantes para poder determinar los tiempos de aireación en el funcionamiento temporizado. Asimismo, la acumulación de agua presente en el reactor con un tiempo de retención hidráulico prolongado retrasa la detección de los cambios, generando incertidumbre en los valores y en la realización de ajustes.

Automatizando el sistema se podrían mejorar con mayor precisión las variaciones de las cargas contaminantes en el interior del reactor, lo que resultaría en una reducción de costos en cuanto a recursos.

- Los resultados de la monitorización muestran que en la fase de aireación se produce una nitrificación rápida durante los primeros minutos de introducción de aire al sistema. Esto podría ser contraproducente si el sistema trabajara en modo carrusel o continuo, ya que resultaría en un arranque y parada continuo de las soplantes. Sin embargo, dado que el reactor está operando en modo SBR, esta rápida nitrificación no generaría problemas como desgaste mecánico, sobrecalentamiento o aumento en el consumo, ya que las soplantes solo se activarían durante la fase de aireación, que sigue a la etapa de carga, donde la concentración de amonio es elevada.

En resumen, aunque no se ha podido verificar directamente cómo afecta la operación mediante la automatización, con el presente estudio se ha logrado optimizar el sistema de aireación, reduciendo el tiempo de funcionamiento de las soplantes por ciclo un 33.3%. Además, tras la monitorización realizada se ha podido determinar que con la automatización se podría reducir aún más el tiempo en el que las soplantes suministran aire y obtener así un ahorro energético, donde en el peor de los casos, la reducción sería de un 17% y en el mejor de un 67%, que se corresponde a un ahorro de 9 y 38 kWh/d respectivamente con respecto al tiempo mínimo establecido para el modo temporizado. Para profundizar, se propone realizar un proyecto adicional con el objetivo principal de estudiar el funcionamiento del proceso una vez implementada la automatización y el impacto que supondría en el consumo energético.

3 Propuestas de mejora

Por motivos de confidencialidad, la información detallada de este apartado ha sido eliminada del proyecto.

4 Anexos

Por motivos de confidencialidad, la información detallada de este apartado ha sido eliminada del proyecto. Esto incluye cálculos específicos, analíticas y datos específicos sobre la evolución de los compuestos.

En caso de que se requiera consultar algún dato confidencial, deberá ponerse en contacto con la empresa Cadagua, S.A.

5 Planos

Por motivos de confidencialidad, la información detallada de este apartado ha sido eliminada del proyecto.

En caso de que se requiera consultar algún plano, deberá ponerse en contacto con la empresa Cadagua, S.A.